

## 審査の結果の要旨

氏 名 趙 漢 居

本論文は「多自由度系マルチロータ飛行ロボットの一般化構成理論と行動生成法の研究」と題し、以下の8章から構成されている。

第1章「序論」では、飛行ロボットの新しい展開として、従来の重心移動だけでなく、空中物体把持運搬や狭隘環境での変形飛行といった高次な操作行動の実現を目指し、そのための新しい機体構成として多リンク構造を有する多自由度系マルチロータ飛行ロボットを定義し、その機体構成理論と行動生成法の解明を本論文の目的として定めている。

第2章「多自由度系マルチロータ飛行ロボットの一般化設計手法」では、推力発生に関する流体力学の基本特性と推力機構の分類について述べ、空中定位させる推力ベクトルの解候補の中で、エネルギー最小かつ安定余裕最大な解を最適とし、これを最適定位推力(OHF:Optimal Hovering Force)と名付け、機体の取りうる全ての姿勢と形状において、最もエネルギーを必要として安定余裕の少ないOHFを求めることによって、機体設計時の推力機構や計算資源、電源資源の特性を決める一般化設計手法を提案した。

第3章「多自由度系の一般化飛行制御理論」では、多リンク構造を時変の単一剛体とした仮定の下で、多自由度系マルチロータ飛行ロボットの重心運動に関する一般化力学モデルを導出した。また、前章で提案した最適定位推力(OHF)を考慮した機体重心の高高度及び回転運動の4自由度に関する最適制御を提案し、二次元変形型の多リンク構造マルチロータ飛行ロボット、推力偏向機構を持った閉リンク構造マルチロータ飛行ロボット、三次元変形型の多リンク構造マルチロータ飛行ロボットの、それぞれの形態における制御法を導出した。

第4章「多自由度系の一般化プラットフォームの構築法」では、多自由度系マルチロータ飛行ロボットの実機実現に必要なプラットフォームの構築法として、マルチセンサ間の時間遅れを考慮した情報統合に基づく状態推定法、リンク数に依存せずに実機体内各層を繋げる分散計算資源のバス接続系、制御システムの安全性・安定性の開発と評価を行うための実・仮想世界の透過的制御系基盤システムの構成法を示した。

第5章「多自由度系モデルの機体実装と飛行動作の評価」では、二次元変形型の多リンク構造マルチロータ飛行ロボット、推力偏向機構を持った閉多リンク構造マルチロータ飛行ロボット、三次元変形型の多リンク構造マルチロータ飛行ロボットの各多自由度

系マルチロータ飛行ロボットの実装を示し、任意機体姿勢での空中定位や変形飛行といった基本飛行動作に関して提案した飛行制御理論の評価を行った。その中で、シングルロータでは姿勢変化時の水平運動に関する追従性の低下がみられたが、能動的な推力偏向機構を持ったデュアルロータにより、三次元変形を伴う定位飛行動作の安定制御が可能になることを実証的に示した。

第6章「重心運動空間における行動生成法」では、前章で実現した安定な定位飛行動作を発展させ、機体形状が不変である場合における重心運動空間の飛行行動生成法を示している。まず、目標移動動作に関する高い追従性を実現するため、時系列の目標位置姿勢以外に目標速度を計画することを提案し、3章で述べた制御理論への組み込み法を示した。また、俯瞰視覚システムを用いた対象検出と並進運動推定に基づく目標移動物体の追従運動生成と、レーザセンサを用いた二次元マップ生成に基づいた未知空間での探索運動生成のそれぞれの実証実験を通じて、目標とする行動への高い追従性が可能であり、安定な重心運動が実現できることを示した。

第7章「多自由度運動空間における高次動作の一般化行動生成法」では、前章で実現した重心運動空間での行動生成法をさらに発展させ、多リンク系の関節運動を考慮した多自由度運動空間での行動生成法を、最適定位推力（OHF）に基づく飛行安定性を考慮した探索問題として定式化した。具体例として、多自由度空間を低次元空間に投影し、関節トルクとOHFを最小にする安定把持形状を探索的に発見する手法による全身抱え込み動作による物体把持運搬行動の生成法と、OHFに加え推力の配置、重なり合い、リンクの傾き角を含めた飛行安定性の状態評価法に基づいた空中変形による狭隘空間での潜り行動の生成法を示し、空中での高次な操作行動の実現が可能なことを示した。

第8章「結論」では、多自由度系マルチロータ飛行ロボット体系の提案、多自由度系飛行ロボットの機体構成の実現、多自由度を利用した空中変形を伴う高次動作の実現、多自由度系モデルの理論構築における一般化の実現からなる、本研究の成果をまとめている。

以上、これを要するに、従来はその行動が重心移動に制限されていた飛行ロボットに対し、その形態を多リンク系へと拡張することで移動行動だけでなく操作行動をも可能にし、その学術体系として多自由度系マルチロータ飛行ロボットの設計論、制御法、動作生成法、行動計画法、システム構成論を構築し、その有用性を実際の飛行ロボットを用いた二次元リンク変形による空中物体把持運搬行動や、三次元リンク変形による狭隘環境での潜り抜け変形飛行行動の実現を通じて実証的に示したものであり、知能機械情報学へ貢献するところ少なくない。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。